

(19)



(11)

EP 3 902 128 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
27.10.2021 Patentblatt 2021/43

(51) Int Cl.:
H02M 1/14 (2006.01) **H02M 1/15** (2006.01)
H02M 1/42 (2007.01) **H02M 1/00** (2006.01)
H02M 7/483 (2007.01)

(21) Anmeldenummer: **20170296.6**

(22) Anmeldetag: **20.04.2020**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
 GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
 PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
 Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
 Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(71) Anmelder: **Siemens Aktiengesellschaft**
80333 München (DE)

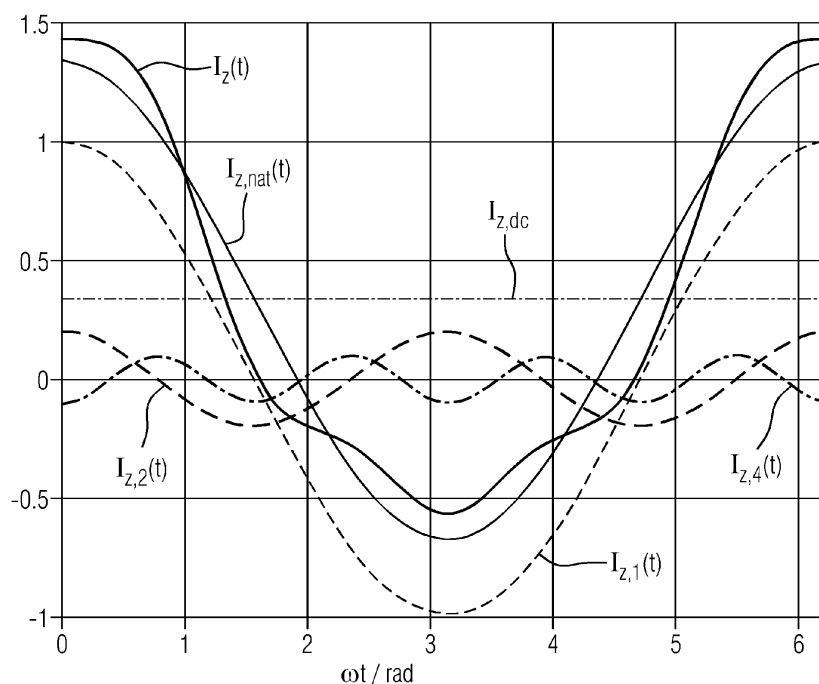
(72) Erfinder:
 • **Schuster, Dominik**
91456 Diespeck (DE)
 • **Burkhardt, Matthias**
91052 Erlangen (DE)
 • **Semmler, Sebastian**
90427 Nürnberg (DE)

(54) UMRICHTER UND VERFAHREN ZU DEREN BETRIEB

(57) Die Erfindung bezieht sich unter anderem auf ein Verfahren zum Betreiben eines Umrichters (10), insbesondere Multilevelumrichters, der zumindest zwei mit Teilmodulen (SM) ausgestattete Modulzweige (TS) aufweist, wobei durch Ansteuerung der Teilmodule (SM) in den Modulzweigen jeweils ein Strom - nachfolgend erste Stromharmonische (I_{z1}) genannt - erzeugt wird, der eine vorgegebene Grundfrequenz aufweist, und wobei durch Ansteuerung der Teilmodule (SM) ein zusätzlicher, in-

nerhalb des Umrichters (10) fließender, Kreisstrom - nachfolgend zweite Stromharmonische (I_{z2}) genannt - erzeugt wird, der die doppelte Grundfrequenz aufweist.

Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass durch Ansteuerung der Teilmodule (SM) ein zusätzlicher, innerhalb des Umrichters (10) fließender, Kreisstrom - nachfolgend vierte Stromharmonische (I_{z4}) genannt - erzeugt wird, der die vierfache Grundfrequenz aufweist.

FIG 4**EP 3 902 128 A1**

Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf Umrichter, insbesondere Multilevelumrichter, und Verfahren zu deren Betrieb.

[0002] Multilevelumrichter sind beispielsweise aus der Druckschrift "Modular Multilevel Converter: An universal concept for HVDC-Networks and extended DC-Bus-applications" (R. Marquardt, The 2010 International Power Electronics Conference, 978-1-4244-5393-1/10, 2010 IEEE) bekannt. Der dort beschriebene Multilevelumrichter umfasst drei parallel geschaltete Reihenschaltungen, deren äußere Anschlüsse Gleichspannungsanschlüsse des Multilevelumrichters bilden. Jede der parallel geschalteten Reihenschaltungen umfasst jeweils mindestens zwei in Reihe geschaltete Teilmodule, die jeweils mindestens zwei Schalter und einen Kondensator umfassen. Durch eine geeignete Ansteuerung der Schalter lässt sich das Spannungsniveau an den Gleichspannungsanschlüssen einstellen.

[0003] Aus der Druckschrift "Loss optimization of MMC by Second-order-Harmonic Circulating Injection" (Yang, Li, Li, Wang, Xu, Gou, IEEE Transactions on Power Electronics, DOI 10.1109/TPEL.2017.2751068) ist ein Verfahren mit den Merkmalen gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 bekannt. Bei dem vobekannten Verfahren wird mit dem Ziel einer Reduktion der elektrischen Verluste im Umrichter ein zusätzlicher, nur innerhalb des Umrichters fließender, Kreisstrom erzeugt, der die doppelte - bezogen auf die Grundfrequenz des Umrichters - Frequenz aufweist und nachfolgend zweite Stromharmonische genannt wird.

[0004] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der beschriebenen Art weiter zu verbessern.

[0005] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren mit den Merkmalen gemäß Patentanspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens sind in Unteransprüchen angegeben.

[0006] Danach ist erfindungsgemäß vorgesehen, dass durch Ansteuerung der Teilmodule ein zusätzlicher, innerhalb des Umrichters fließender, Kreisstrom - nachfolgend vierte Stromharmonische genannt - erzeugt wird, der die vierfache Grundfrequenz aufweist.

[0007] Ein wesentlicher Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, dass - verglichen mit der Aufschaltung allein der zweiten Stromharmonischen - durch die zusätzliche Aufschaltung der vierten Stromharmonischen die elektrischen Verluste noch weiter reduziert werden können. Alternativ oder zusätzlich ist es möglich, den Peakstrom (Spitzenstrom) im Umrichter bzw. die maximale Amplitude der Zweigströme mit Hilfe der vierten Stromharmonischen zu reduzieren.

[0008] Vorteilhaft ist es, wenn die elektrischen Verluste des Umrichters durch die vierte Stromharmonische auf ein Maß reduziert werden, das kleiner ist als bei einem Betrieb des Umrichters allein mit der ersten und zweiten Stromharmonischen.

[0009] Durch die Ansteuerung der Teilmodule wird vorzugsweise die Phasenlage der zweiten Stromharmonischen relativ zur Phase der ersten Stromharmonischen konstant gehalten.

[0010] Vorzugsweise erfolgt die Ansteuerung der Teilmodule derart, dass die Maxima der ersten Stromharmonischen jeweils mit einem Maximum der zweiten Stromharmonischen zusammenfallen, wenn der Gleichstromanteil in den Zweigströmen positiv ist, und die Minima der ersten Stromharmonischen jeweils mit einem Minimum der zweiten Stromharmonischen zusammenfallen, wenn der Gleichstromanteil in den Zweigströmen negativ ist.

[0011] Für eine cosinusförmige Grundschiwingung bzw. cosinusförmige erste Stromharmonische gemäß

$$I_{z1} = A_{z1} \cos(\omega t) \text{ mit } A_{z1} > 0$$

wobei I_{z1} die erste Stromharmonische, A_{z1} die Amplitude der ersten Stromharmonischen, ω die Kreisfrequenz des Stromes und t die Zeit bezeichnet, gilt also vorzugsweise:

$$I_{z2}(t) = \text{sign}(I_{zdc}) \cdot A_{z2} \cdot \cos(2\omega t) \text{ mit } A_{z2} > 0$$

wobei I_{z2} die zweite Stromharmonische, A_{z2} die Amplitude der zweiten Stromharmonischen und I_{zdc} den Gleichstromanteil in dem jeweiligen Zweigstrom bezeichnet.

[0012] Mit anderen Worten ist es vorteilhaft, wenn die zweite Stromharmonische I_{z2} - im Cosinussystem - genau phasengleich zur ersten Stromharmonischen I_{z1} aufgeschaltet und mit der Stromrichtung des Gleichstromanteils I_{zdc} des Zweigstromes I_z multipliziert wird. Die aufgeschaltete zweite Stromharmonische I_{z2} ist damit so aufgeschaltet, dass sie den innerhalb der Netzperiode auftretenden, maximalen Betragswert bzw. Betragspeak des natürlichen Zweigstroms um genau die Amplitude A_{z2} der zweiten Stromharmonischen I_{z2} vergrößert.

[0013] Durch die Ansteuerung der Teilmodule wird vorzugsweise auch die Phasenlage der vierten Stromharmonischen relativ zur Phase der ersten Stromharmonischen konstant gehalten.

[0014] Bezüglich der vierten Stromharmonischen wird es als vorteilhaft angesehen, wenn die Ansteuerung der Teil-

module derart erfolgt, dass die Maxima der ersten Stromharmonischen jeweils mit einem Minimum der vierten Stromharmonischen zusammenfallen, wenn der Gleichstromanteil in den Zweigströmen positiv ist, und die Minima der ersten Stromharmonischen jeweils mit einem Maximum der vierten Stromharmonischen zusammenfallen, wenn der Gleichstromanteil in den Zweigströmen negativ ist.

[0015] Für eine cosinusförmige Grundschiwingung bzw. cosinusförmige erste Stromharmonische wird die Phasenlage also vorzugsweise so eingestellt, dass folgende Beziehung erfüllt ist:

$$I_{z4}(t) = - \operatorname{sign}(I_{zdc}) \cdot A_{z4} \cdot \cos(4\omega t) \quad \text{mit } A_{z4} > 0$$

wobei I_{z4} die vierte Stromharmonische und A_{z4} die Amplitude der vierten Stromharmonischen bezeichnet.

[0016] Die vierte Stromharmonische I_{z4} wird - im Cosinussystem der Grundschiwingung - also invers zur zweiten Stromharmonischen I_{z2} aufgeschaltet. Sie verringert damit den maximalen Betragswert des natürlichen Zweigstroms um den Amplitudenwert A_{z4} der vierten Stromharmonischen I_{z4} .

[0017] Für den resultierenden Zweigstrom I_z ergibt sich damit:

$$I_z(t) = I_{zdc} + A_{z1} \cdot \cos(\omega t) + \operatorname{sign}(I_{zdc}) \cdot A_{z2} \cdot \cos(2\omega t) - \operatorname{sign}(I_{zdc}) \cdot A_{z4} \cdot \cos(4\omega t)$$

[0018] Durch die mit fixierter, relativer Phasenlage invers aufgeschaltete vierte Stromharmonische lässt sich der Zweigstrompeak - im Vergleich zur alleinigen Aufschaltung nur der zweiten Stromharmonischen - stark reduzieren. Außerdem ist durch die fixierte, relative Phasenlage der zweiten und vierten Stromharmonischen der Peakwert des Zweigstromes stets einfach bestimmbar: Der Peakwert entspricht der Summe aus dem DC-Anteil und den Amplituden der ersten und zweiten Stromharmonischen, abzüglich der Amplitude der vierten Stromharmonischen.

[0019] Das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der vierten Stromharmonischen und der Amplitude der zweiten Stromharmonischen wird durch die Ansteuerung der Teilmodule vorzugsweise konstant gehalten.

[0020] Vorteilhaft ist es, wenn durch die Ansteuerung der Teilmodule das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der vierten Stromharmonischen und der Amplitude der zweiten Stromharmonischen in einem Bereich zwischen 0,4 und 0,7 gehalten wird. Die resultierende Aufschaltung der Stromharmonischen ist bei der letztgenannten Variante sehr einfach durchführbar; denn sie kann über eine einzige Größe, die Amplitude der zweiten Stromharmonischen eingestellt und geführt werden. Die vierte Stromharmonische folgt über einen festen Faktor k .

[0021] Der Wert, auf den das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der zweiten Stromharmonischen und der Amplitude der ersten Stromharmonischen geregelt wird, wird vorzugsweise derart gewählt, dass die elektrischen Verluste des Umrichters minimal werden.

[0022] Vorteilhaft ist es, wenn durch die Ansteuerung der Teilmodule das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der zweiten Stromharmonischen und der Amplitude der ersten Stromharmonischen auf einen Wert geregelt wird, der vom Arbeitspunkt des Umrichters abhängig ist. Der Arbeitspunkt wird vorzugsweise durch Spannungen, Ströme, Leistung und/oder Blindleistung des Umrichters definiert.

[0023] Vorteilhaft ist es insbesondere, wenn durch die Ansteuerung der Teilmodule das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der zweiten Stromharmonischen und der Amplitude der ersten Stromharmonischen auf einen Wert geregelt wird, der vom Leistungsfaktor des Umrichters abhängig ist. Bei einer bevorzugten Variante wird das Amplitudenverhältnis durch Multiplikation des Leistungsfaktors des Umrichters mit einer Konstanten gebildet.

[0024] Besonders vorteilhaft ist es, wenn der Wert, auf den das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der zweiten Stromharmonischen und der Amplitude der ersten Stromharmonischen geregelt wird, im Rahmen vorheriger Simulationen des Umrichters für verschiedene Arbeitspunkte als optimal ermittelt worden ist, und zwar insbesondere mit Blick auf minimale elektrische Verluste des Umrichters im jeweiligen Arbeitspunkt.

[0025] Ein geeignetes bzw. optimales Amplitudenverhältnis kann beispielsweise durch Simulationsrechnungen in Form eines Kennfeldes oder einer Kennlinie für verschiedene Arbeitspunkte des Umrichters ermittelt und abgespeichert werden. Hierzu kann z. B. für eingestellte bzw. vorgegebene Arbeitspunkte das Amplitudenverhältnis A_{z2}/A_{z1} variiert und die jeweils auftretenden Umrichterverluste berechnet werden. Dasjenige Amplitudenverhältnis A_{z2}/A_{z1} , das für den jeweiligen Arbeitspunkt (z. B. definiert durch Wirk- und Blindleistung des Umrichters) zu den geringsten Verlusten führt und/oder gleichzeitig andere Randbedingungen (z. B. betreffend des Unterschreitens einer maximalen Amplitude des Zweigstromes I_z) erfüllt, wird in das Kennfeld eingetragen und später im Betrieb des Umrichters wieder ausgelesen.

[0026] Besonders einfach lässt sich das Verfahren durchführen, wenn der Wert, auf den das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der zweiten Stromharmonischen und der Amplitude der ersten Stromharmonischen geregelt wird, aus einem Speicher ausgelesen wird, in dem für verschiedene Arbeitspunkte der jeweils einzustellende Wert abgespeichert ist.

[0027] Der Umrichter ist vorzugsweise mit zumindest einem Wechselspannungsanschluss, an dem ein Wechselstrom eingespeist oder entnommen werden kann, und zumindest einem Gleichspannungsanschluss, an dem ein Gleichstrom eingespeist oder entnommen werden kann, ausgestattet. Zumindest zwei parallel geschaltete Reihenschaltungen bilden vorzugsweise äußere Gleichspannungsanschlüsse des Umrichters.

[0028] Vorteilhaft ist es, wenn durch die Ansteuerung der Teilmodule das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der zweiten Stromharmonischen und der Amplitude der ersten Stromharmonischen auf einen Wert geregelt wird, der in Abhängigkeit vom jeweiligen Energiefluss, insbesondere Wirkleistungsfluss und/oder Blindleistungsfluss, zwischen der Gleichspannungsseite bzw. den Gleichspannungsanschlüssen und der Wechselspannungsseite bzw. den Wechselspannungsanschlüssen des Umrichters ausgesucht bzw. bestimmt wird.

[0029] Als Umrichter wird bevorzugt ein Sechspuls-Multilevelumrichter betrieben.

[0030] Die Erfindung bezieht sich darüber hinaus auf einen Umrichter, insbesondere Multilevelumrichter, der zumindest zwei mit Teilmodulen ausgestattete Modulzweige sowie eine Steuereinrichtung aufweist, die durch Ansteuerung der Teilmodule in den Modulzweigen jeweils einen Strom - nachfolgend erste Stromharmonische genannt - erzeugt, der eine vorgegebene Grundfrequenz aufweist, und durch Ansteuerung der Teilmodule des Umrichters einen zusätzlichen, innerhalb des Umrichters fließenden, Kreisstrom - nachfolgend zweite Stromharmonische genannt - erzeugt, der die doppelte Grundfrequenz aufweist.

[0031] Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass die Steuereinrichtung derart ausgestaltet ist, dass sie durch Ansteuerung der Teilmodule einen zusätzlichen, innerhalb des Umrichters fließenden Kreisstrom - nachfolgend vierte Stromharmonische genannt - erzeugt, der die vierfache Grundfrequenz aufweist.

[0032] Bezüglich der Vorteile des erfindungsgemäßen Umrichters sei auf die oben erläuterten Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens verwiesen, da die Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens denen des erfindungsgemäßen Umrichters im Wesentlichen entsprechen.

[0033] Als vorteilhaft wird es angesehen, wenn die Steuereinrichtung die elektrischen Verluste des Umrichters und/oder den Maximalwert des Betrags der Zweigströme durch die vierte Stromharmonische reduziert, sodass diese kleiner sind als bei einem Betrieb des Umrichters allein mit der ersten und zweiten Stromharmonischen.

[0034] Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert; dabei zeigen beispielhaft

Figur 1 ein Ausführungsbeispiel für einen erfindungsgemäßen Umrichter,

Figur 2 ein Ausführungsbeispiel für ein Teilmodul, das zur Bildung von Modulzweigen bei dem Umrichter gemäß Figur 1 eingesetzt werden kann,

Figur 3 ein weiteres Ausführungsbeispiel für ein Teilmodul, das zur Bildung von Modulzweigen bei dem Umrichter gemäß Figur 1 eingesetzt werden kann,

Figur 4 einen Verlauf der zweiten und vierten Stromharmonischen relativ zur ersten Stromharmonischen und relativ zum natürlichen Zweigstrom für einen positiven Gleichstromanteil,

Figur 5 einen Verlauf der zweiten und vierten Stromharmonischen relativ zur ersten Stromharmonischen und relativ zum natürlichen Zweigstrom für einen negativen Gleichstromanteil,

Figur 6 ein zweidimensionales Kennfeld zur Bestimmung eines geeigneten bzw. optimalen Amplitudenverhältnisses zwischen der Amplitude der ersten Stromharmonischen und der Amplitude der zweiten Stromharmonischen in Abhängigkeit vom Wirk- und Blindstrom und

Figur 7 eine Kennlinie zur Bestimmung eines geeigneten bzw. optimalen Amplitudenverhältnisses zwischen der Amplitude der ersten Stromharmonischen und der Amplitude der zweiten Stromharmonischen in Abhängigkeit vom Wirkstrom.

[0035] In den Figuren werden der Übersicht halber für identische oder vergleichbare Komponenten stets dieselben Bezugszeichen verwendet.

[0036] Die Figur 1 zeigt einen Umrichter 10, der auf seiner ersten Anschlussseite (Wechselspannungsseite) AS1 drei Wechselspannungsanschlüsse L1, L2 und L3 aufweist, an denen jeweils ein Wechselstrom in den Umrichter 10 eingespeist oder aus diesem entnommen werden kann. Auf einer zweiten Anschlussseite (Gleichspannungsseite) AS2 befinden sich zwei Gleichspannungsanschlüsse, an denen ein Gleichstrom I_{dc} in den Umrichter 10 eingespeist oder aus diesem entnommen werden kann; diese sind in der Figur 1 mit dem Bezugszeichen L+ und L- gekennzeichnet.

[0037] Die Gleichspannung zwischen den Gleichspannungsanschlüssen L+ und L- trägt das Bezugszeichen U_{dc} . Die jeweils zwischen den Wechselspannungsanschlüssen L1, L2 und L3 anliegende Wechselspannung trägt das Bezugs-

zeichen Uac.

[0038] Der Umrichter 10 weist drei Reihenschaltungen R1, R2 und R3 auf, deren äußere Anschlüsse die Gleichspannungsanschlüsse L+ und L- des Umrichters 10 bilden. Die Reihenschaltungen R1, R2 und R3 umfassen jeweils zwei in Reihe geschaltete Modulzweige TS.

[0039] Jeder der Modulzweige TS weist jeweils mindestens zwei in Reihe geschaltete Teilmodule SM auf, die jeweils mindestens zwei Schaltelemente und einen Kondensator umfassen. Ausführungsbeispiele für geeignete Teilmodule SM werden nachfolgend beispielhaft im Zusammenhang mit den Figuren 2 und 3 erläutert.

[0040] Der Umrichter 10 weist eine Steuereinrichtung 20 auf, die zur Ansteuerung der Teilmodule SM und damit zur Ansteuerung der Modulzweige TS geeignet ist. Die Steuereinrichtung 20 weist zu diesem Zweck eine Recheneinrichtung 21 sowie einen Speicher 22 auf. In dem Speicher 22 ist ein Steuerprogrammmodul SPM gespeichert, das die Arbeitsweise der Recheneinrichtung 21 bestimmt.

[0041] Ein mögliches Betriebsverfahren für den Umrichter 10 wird weiter unten im Zusammenhang mit den Figuren 4 bis 7 näher erläutert.

[0042] Die Figur 2 zeigt ein Ausführungsbeispiel für ein Teilmodul SM, das zwei Schaltelemente S in Form von Transistoren, denen jeweils eine Diode D parallel (bzw. antiparallel) geschaltet ist, sowie als Energiespeicher einen Kondensator C umfasst. Die genannten Komponenten bilden eine Halbbrückenschaltung, die durch Ansteuern der Schaltelemente S - seitens der Steuereinrichtung 20 gemäß Figur 1 - einen unipolaren Betrieb des Kondensators C ermöglicht. Die Transistoren und die jeweils parallel geschalteten Dioden D können vorgefertigte Bauteile sein, wie in den Figuren zeichnerisch durch Kästen angedeutet ist; die Transistoren und die jeweils parallel geschalteten Dioden D können beispielsweise IGBT-Bauelemente sein.

[0043] Im aktiven Betrieb des Teilmoduls SM ist jeweils eines der beiden Schaltelemente S eingeschaltet und das andere Schaltelement S ausgeschaltet. Ist das in der Figur 2 obere Schaltelement S ein- und das untere Schaltelement S ausgeschaltet, so ist der Kondensator C zwischen die zwei Anschlüsse A1 und A2 geschaltet und elektrisch aktiv; ist das in der Figur 2 obere Schaltelement aus- und das untere Schaltelement eingeschaltet, so ist der Kondensator C überbrückt und durch die Dioden von den zwei Anschlüssen A1 und A2 getrennt.

[0044] Im passiven Betrieb des Teilmoduls SM sind beide Schaltelemente S ausgeschaltet.

[0045] Die Figur 3 zeigt ein Ausführungsbeispiel für ein Teilmodul SM, das vier Schaltelemente S in Form von Transistoren, denen jeweils eine Diode parallel geschaltet ist, sowie als Energiespeicher einen Kondensator C umfasst. Die genannten Komponenten bilden eine Vollbrückenschaltung, die durch Ansteuern der Schaltelemente S - seitens der Steuereinrichtung 20 gemäß Figur 1 - einen bipolaren Betrieb des Kondensators C ermöglicht.

[0046] Im aktiven Betrieb des Teilmoduls SM gemäß Figur 3 sind jeweils zwei der vier Schaltelemente S eingeschaltet und die beiden anderen ausgeschaltet. Im passiven Betrieb des Teilmoduls SM gemäß Figur 3 sind alle vier Schaltelemente S ausgeschaltet.

[0047] Bevorzugte Arbeitsweisen des Steuerprogrammmoduls SPM sollen nachfolgend beispielhaft beschrieben werden:

In bekannter Weise werden die Teilmodule SM in jedem der Modulzweige bezüglich der Grundfrequenz des Umrichters, beispielsweise bezüglich der Grundfrequenz von 50 Hz oder 60 Hz, derart angesteuert, dass ein gewünschter Energiefluss zwischen den Anschlusseiten AS1 und AS2 auftritt bzw. gewünschte Wechselströme auf der ersten Anschlusseite AS1 und ein gewünschter Gleichstrom I_{dc} auf der zweiten Anschlusseite AS2 fließt. Die in den Modulzweigen fließenden Ströme mit der Grundfrequenz werden nachfolgend erste Stromharmonische genannt.

[0048] Darüber hinaus werden die Teilmodule SM in den Modulzweigen derart angesteuert, dass umrichterinterne Kreissströme fließen, also Ströme, die nur in den Zweigen des Umrichters 10 zirkulieren und den Umrichter 10 nach außen hin nicht verlassen, also weder auf der ersten noch auf der zweiten Anschlusseite AS1 bzw. AS2 sichtbar sind. Die umrichterinternen Kreissströme sind in der Figur 1 mit einem Pfeil mit dem Bezugszeichen I_k gekennzeichnet.

[0049] Das sogenannte Aufschalten von umrichterinternen Kreissströmen und die diesbezüglichen Maßnahmen hinsichtlich der Ansteuerung der Teilmodule SM sind allgemein bekannt, sodass diesbezüglich auf die Literatur verwiesen sei. So ist beispielsweise aus der bereits eingangs genannten Druckschrift "Loss optimization of MMC by Second-order Harmonic Circulating Injection" (Yang, Li, Li, Wang, Xu, Gou, IEEE Transactions on Power Electronics, DOI 10.1109/TPEL.2017.2751068) ein Aufschalten von Kreissströmen mit doppelter Grundfrequenz, also der zweiten Stromharmonischen, bekannt.

[0050] Wie nachfolgend beispielhaft näher im Detail beschrieben wird, wird das Steuerprogrammmodul SPM die Schalter der Teilmodule SM derart ansteuern, dass nicht nur eine zweite Stromharmonische, sondern zusätzlich auch eine vierte Stromharmonische in den Kreissströmen vorhanden ist. Die nachfolgenden Erläuterungen beziehen sich auf den Zweigstrom I_z in dem in der Figur 1 oberen Modulzweig TS der rechten Reihenschaltung R3; sie gelten jedoch für die anderen Modulzweige TS im Umrichter 10 entsprechend.

[0051] Nachfolgend wird beispielhaft davon ausgegangen, dass die erste Stromharmonische I_{z1} im Zweigstrom I_z cosinusförmig ist, also Folgendes gilt:

$$I_{z1} = A_{z1} \cos(\omega t),$$

wobei A_{z1} die Amplitude der ersten Stromharmonischen I_{z1} bezeichnet und ein positives Vorzeichen aufweist bzw. größer als Null ist. ω bezeichnet die Kreisfrequenz des Stromes und t die Zeit.

[0052] Die obige Annahme eines cosinusförmigen Verlaufs ist hier nur zum Zwecke der Erläuterung gewählt und bezieht sich auf eine entsprechend willkürlich gewählte Zeitbasis. Im Falle einer anderen Zeitbasis wäre die erste Stromharmonische nicht cosinusförmig, sondern dazu phasenverschoben, beispielsweise sinusförmig. Für die nachfolgenden Erläuterungen ist dies jedoch irrelevant, bei einer anderen Zeitbasis muss in der Formel nur die jeweilige Phasenverschiebung zu dieser anderen jeweiligen Zeitbasis mathematisch berücksichtigt werden.

[0053] Da im Normalbetrieb, auch ohne Aufschaltung von weiteren Stromharmonischen, in den Modulzweigen üblicherweise ein Gleichstrom I_{zdc} auftritt, führt dies zu einem sogenannten natürlichen Zweigstrom I_{znat} gemäß:

$$I_{znat} = I_{zdc} + A_{z1} \cos(\omega t).$$

[0054] Durch eine Aufschaltung der zweiten Stromharmonischen I_{z2} und der vierten Stromharmonischen I_{z4} ergibt sich der resultierende Zweigstrom I_z zu:

$$I_z = I_{znat} + I_{z2}(t) + I_{z4}(t) \text{ bzw.}$$

$$I_z = I_{zdc} + A_{z1} \cos(\omega t) + I_{z2}(t) + I_{z4}(t).$$

[0055] Bezüglich der Amplitude und der Phasenlage der zweiten Stromharmonischen I_{z2} und der vierten Stromharmonischen I_{z4} wird das Steuerprogrammmodul SPM vorzugsweise wie folgt vorgehen:

Zweite Stromharmonische:

[0056] Die Phasenlage der zweiten Stromharmonischen I_{z2} wird vorzugsweise derart eingestellt, dass die Maxima der ersten Stromharmonischen I_{z1} jeweils mit einem Maximum der zweiten Stromharmonischen I_{z2} zusammenfallen, wenn der Gleichstromanteil I_{dc} in dem Zweigstrom I_z positiv ist, und die Minima der ersten Stromharmonischen I_{z1} jeweils mit einem Minimum der zweiten Stromharmonischen I_{z2} zusammenfallen, wenn der Gleichstromanteil I_{dc} in den Zweigstrom I_z negativ ist. Die Phasenlage wird also so eingestellt, dass folgende Beziehung erfüllt ist:

$$I_{z2}(t) = \text{sign}(I_{zdc}) \cdot A_{z2} \cdot \cos(2\omega t) \quad \text{mit } A_{z2} > 0$$

[0057] Die zweite Stromharmonische I_{z2} wird - im Cosinussystem - genau "phasengleich" (bezogen auf den Zeitpunkt $t=0$) zur ersten Stromharmonischen I_{z1} aufgeschaltet und mit der Stromrichtung des Gleichstromanteils I_{dc} des Zweigstromes I_z multipliziert. Die aufgeschaltete zweite Stromharmonische I_{z2} ist damit so aufgeschaltet, dass sie den innerhalb der Netzperiode auftretenden, maximalen Betragswert bzw. Betragspeak des natürlichen Zweigstroms I_{znat} um genau die Amplitude A_{z2} der zweiten Stromharmonischen I_{z2} vergrößert.

[0058] Die Figur 4 zeigt einen beispielhaften Verlauf der zweiten Stromharmonischen I_{z2} relativ zur ersten Stromharmonischen I_{z1} und relativ zum natürlichen Zweigstrom I_{znat} für einen positiven Gleichstromanteil I_{zdc} .

[0059] Die Figur 5 zeigt einen beispielhaften Verlauf der zweiten Stromharmonischen I_{z2} relativ zur ersten Stromharmonischen I_{z1} und relativ zum natürlichen Zweigstrom I_{znat} für einen negativen Gleichstromanteil I_{zdc} .

[0060] Die Amplitude A_{z2} der zweiten Stromharmonischen I_{z2} wird vorzugsweise in Abhängigkeit von der Amplitude A_{z1} der ersten Stromharmonischen I_{z1} eingestellt. Diesbezüglich werden folgende Varianten als vorteilhaft angesehen:

Variante 1:

[0061] Bei einer ersten Variante ist vorgesehen, dass durch die Ansteuerung der Teilmodule das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude A_{z2} der zweiten Stromharmonischen I_{z2} und der Amplitude A_{z1} der ersten Stromharmonischen I_{z1} auf einen Wert geregelt wird, der vom Arbeitspunkt des Umrichters abhängig ist.

[0062] Vorteilhaft ist es beispielsweise, wenn das einzustellende Amplitudenverhältnis A_{z2}/A_{z1} aus einem Kennfeld ausgelesen wird, bei dem das jeweilige Sollamplitudenverhältnis in Abhängigkeit von einer vom Umrichter einzustellenden

den bzw. bereits eingestellten Wirkleistung P (bzw. Wirkleistungsfluss zwischen der Gleichspannungsseite und der Wechselspannungsseite) und einer einzustellenden bzw. bereits eingestellten Blindleistung Q (bzw. Blindleistungsfluss zwischen der Gleichspannungsseite und der Wechselspannungsseite) aufgetragen ist.

[0063] Alternativ kann in vorteilhafter Weise vorgesehen sein, dass das einzustellende Amplitudenverhältnis $Az2/Az1$ aus einem Kennfeld ausgelesen wird, bei dem das jeweilige Sollamplitudenverhältnis in Abhängigkeit von einem vom Umrichter einzustellenden Wirkstrom I_p und einem einzustellenden bzw. bereits eingestellten Blindstrom I_q aufgetragen ist.

[0064] Die Figur 6 zeigt beispielhaft ein solches zweidimensionales Kennfeld in Abhängigkeit vom Wirkstrom I_p und Blindstrom I_q .

[0065] Im laufenden Betrieb des Umrichters 10 wird jeweils von der Konverterregelung bzw. dem Steuerprogrammmodul SPM gemäß Figur 1 anhand des vorliegenden Arbeitspunktes des Konverters, also anhand der jeweiligen Wirk- und Blindleistung oder anhand des jeweiligen Wirk- und Blindstromes, das korrespondierende Amplitudenverhältnis $Az2/Az1$ ausgelesen und nachfolgend eingestellt.

[0066] Das Kennfeld gemäß Figur 6 wird vorzugsweise vor Inbetriebnahme des Umrichters 10 projektspezifisch in Simulationen berechnet. Hierzu wird z. B. für eingestellte bzw. vorgegebene Stützstellen (Arbeitspunkte des Umrichters) das Amplitudenverhältnis $Az2/Az1$ variiert und es werden die auftretenden Umrichterverluste berechnet. Jenes Amplitudenverhältnis $Az2/Az1$, das zu den besten bzw. geringsten Verlusten führt und/oder gleichzeitig andere Randbedingungen (z. B. betreffend des Unterschreitens einer maximalen Amplitude des Zweigstromes I_z) erfüllt, wird in das Kennfeld eingetragen und steht dann für die Steuerung während des Betriebs des Umrichters zur Verfügung.

[0067] Ein Vorteil dieser ersten Variante besteht in einer sehr genauen Kontrolle, so können Grenzwerte für die Amplitude des Zweigstromes I_z arbeitspunktspezifisch berücksichtigt werden.

[0068] Für Arbeitspunkte, die in dem Kennfeld zwischen Stützstellen liegen, kann das Amplitudenverhältnis $Az2/Az1$ beispielsweise durch Interpolation bestimmt werden.

[0069] Anstelle des in den Figuren 6 gezeigten zweidimensionalen Kennfeldes kann auch ein mehrdimensionales Kennfeld gebildet und später für die Bestimmung des Amplitudenverhältnisses $Az2/Az1$ herangezogen werden, wenn mehr als zwei Betriebsparameter des Umrichters 10 berücksichtigt werden sollen.

Variante 2:

[0070] Bei einer zweiten Variante ist vorgesehen, dass das Amplitudenverhältnis $Az2/Az1$ zwischen der Amplitude $Az2$ der zweiten Stromharmonischen I_{z2} und der Amplitude $Az1$ der ersten Stromharmonischen I_{z1} ermittelt wird durch Auswerten einer eindimensionalen Kennlinie und einer nachfolgenden Multiplikation eines anhand der eindimensionalen Kennlinie ermittelten Zwischenwerts ZW mit einem Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$.

[0071] Die Figur 7 zeigt beispielhaft eine solche eindimensionale Kennlinie für den Zwischenwert ZW in Abhängigkeit von dem Wirkstrom I_p . Alternativ kann die eindimensionale Kennlinie für den Zwischenwert ZW auch in Abhängigkeit von der Wirkleistung P aufgetragen sein.

[0072] Die eindimensionale Kennlinie wird vorzugsweise vor Inbetriebnahme des Umrichters 10 projektspezifisch für Arbeitspunkte ohne Blindleistung, also nur in Abhängigkeit von der Wirkleistung, in Simulationen berechnet. Hierzu wird z. B. für eingestellte bzw. vorgegebene Stützstellen der eindimensionalen Kennlinie das Amplitudenverhältnis $Az2/Az1$ variiert und es werden die auftretenden Umrichterverluste berechnet. Jenes Amplitudenverhältnis $Az2/Az1$, das zu den besten Verlusten führt und/oder gleichzeitig andere Randbedingungen (z. B. das Einhalten einer maximalen Amplitude des Zweigstromes I_z) erfüllt, wird in Form eines Zwischenwerts ZW in die eindimensionale Kennlinie eingetragen.

[0073] In der eindimensionalen Kennlinie sind - wie erwähnt - die optimalen Zwischenwerte ZW vorzugsweise nur für Arbeitspunkte ohne Blindleistung aufgetragen, also eindimensional über der Wirkleistung P oder dem Wirkstrom I_p , wobei die Blindleistung Q bzw. der Blindstrom I_q als Null angenommen bzw. festgesetzt wird.

[0074] Im laufenden Betrieb des Umrichters 10 wird jeweils von der Konverterregelung bzw. dem Steuerprogrammmodul SPM gemäß Figur 1 anhand des vorliegenden Arbeitspunktes des Konverters, hier also anhand der jeweiligen Wirkleistung P oder anhand des jeweiligen Wirkstromes I_p , der korrespondierende Zwischenwert $ZW(P, I_p)$ ausgelesen. Für Arbeitspunkte, die in der Kennlinie zwischen Stützstellen liegen, kann der Zwischenwert ZW beispielsweise durch Interpolation bestimmt werden.

[0075] Anschließend wird, um die jeweilige Blindleistung Q zu berücksichtigen, der ausgelesene Zwischenwert $ZW(P, I_p)$ mit dem jeweiligen Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ des Umrichters 10 multipliziert, woraus sich das Amplitudenverhältnis $Az2/Az1$ ergibt gemäß:

$$Az2/Az1 = ZW(P, I_p) \cdot \cos(\varphi)$$

$$A_{z2}/A_{z1} = Z_W(P, I_p) \cdot \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

wobei P die Wirkleistung und Q die Blindleistung bezeichnet.

[0076] Ein Vorteil dieser zweiten Variante besteht in einem reduzierten Aufwand, wobei dennoch ein gutes Ergebnis hinsichtlich einer Reduktion der elektrischen Verluste erreicht wird.

Variante 3:

[0077] Bei einer dritten Variante ist vorgesehen, dass zur Ermittlung des Amplitudenverhältnisses A_{z2}/A_{z1} eine fest vorgegebene Konstante K mit dem jeweiligen Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ des Umrichters 10 multipliziert wird gemäß:

$$A_{z2}/A_{z1} = K \cdot \cos(\varphi) \quad \text{mit}$$

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

[0078] Ein Vorteil dieser dritten Variante besteht in einem sehr geringen Aufwand, wobei dennoch ein akzeptables Ergebnis hinsichtlich einer Reduktion der elektrischen Verluste erreicht wird.

Vierte Stromharmonische:

[0079] Die Phasenlage der vierten Stromharmonischen wird vorzugsweise derart eingestellt, dass die Maxima der ersten Stromharmonischen I_{z1} jeweils mit einem Minimum der vierten Stromharmonischen I_{z4} zusammenfallen, wenn der Gleichstromanteil I_{dc} in dem Zweigstrom I_z positiv ist, und die Minima der ersten Stromharmonischen I_{z1} jeweils mit einem Maximum der vierten Stromharmonischen I_{z4} zusammenfallen, wenn der Gleichstromanteil I_{dc} in dem Zweigstrom I_z negativ ist. Die Phasenlage wird also so eingestellt, dass folgende Beziehung erfüllt ist:

$$I_{z4}(t) = - \operatorname{sign}(I_{zdc}) \cdot A_{4z} \cdot \cos(4\omega t) \quad \text{mit } A_{4z} > 0$$

[0080] Die vierte Stromharmonische I_{z4} wird - im Cosinussystem - also invers zur zweiten Stromharmonischen I_{z2} aufgeschaltet. Sie verringert damit den maximalen Betragswert des natürlichen Zweigstroms I_{znat} um den Amplitudenwert A_{z4} der vierten Stromharmonischen I_{z4} .

[0081] Es gibt bei der beschriebenen Vorgehensweise - abgesehen von der Richtungsumkehr in Abhängigkeit von der Stromrichtung des Gleichstromanteils I_{zdc} - keine variable bzw. vom Arbeitspunkt des Umrichters 10 abhängige, veränderliche Phasenverschiebung zwischen den aufgeschalteten Stromharmonischen I_{z2} und I_{z4} relativ zur gegebenen Grundschwingung bzw. ersten Stromharmonischen I_{z1} .

[0082] Für den resultierenden Zweigstrom I_z ergibt sich damit:

$$I_z(t) = I_{zdc} + A_{z1} \cdot \cos(\omega t) + \operatorname{sign}(I_{zdc}) \cdot (A_{z2} \cos(2\omega t) - A_{z4} \cos(4\omega t))$$

[0083] Die bereits oben angesprochene Figur 4 zeigt auch einen beispielhaften Verlauf der vierten Stromharmonischen I_{z4} relativ zur ersten und zweiten Stromharmonischen I_{z1} , I_{z2} und relativ zum natürlichen Zweigstrom I_{znat} für einen positiven Gleichstromanteil I_{zdc} .

[0084] Die Figur 5 zeigt einen beispielhaften Verlauf der vierten Stromharmonischen I_{z4} relativ zur ersten und zweiten Stromharmonischen I_{z1} , I_{z2} und relativ zum natürlichen Zweigstrom I_{znat} für einen negativen Gleichstromanteil I_{zdc} .

[0085] Es lässt sich in den Figuren 4 und 5 erkennen, dass durch die mit fixierter Phasenlage invers aufgeschaltete vierte Stromharmonische I_{z4} der Zweigstrompeak des Zweigstromes I_z - im Vergleich zur alleinigen Aufschaltung nur der zweiten Stromharmonischen I_{z2} - stark reduziert wird.

[0086] Durch die fixierte Phasenlage der Stromharmonischen I_{z2} und I_{z4} ist der Peakwert des Zweigstromes I_z im

Übrigen stets einfach bestimmbar; er kann durch Summieren des Gleichstromanteils I_{zdc} und der Amplituden A_{z1} und A_{z2} der ersten und zweiten Stromharmonischen, abzüglich der Amplitude A_{z4} der vierten Stromharmonischen, gebildet werden.

[0087] Die Amplitude A_{z4} der vierten Stromharmonischen I_{z4} wird vorzugsweise in Abhängigkeit von der Amplitude A_{z2} der zweiten Stromharmonischen I_{z2} eingestellt. Diesbezüglich wird es als vorteilhaft angesehen, wenn das Amplitudenverhältnis A_{z4}/A_{z2} zwischen der Amplitude A_{z4} der vierten Stromharmonischen und der Amplitude A_{z2} der zweiten Stromharmonischen konstant gehalten wird.

[0088] Besonders vorteilhaft ist es, wenn das Amplitudenverhältnis A_{z4}/A_{z2} zwischen 0,4 und 0,7 eingestellt wird, also gilt:

$$0,4 \leq A_{z4}/A_{z2} \leq 0,7$$

[0089] Optimal ist in der Regel ein Wert für A_{z4}/A_{z2} von $0,5 \pm 10\%$.

[0090] Die oben beispielhaft beschriebenen Verfahren zum Aufschalten einer zweiten und vierten Stromharmonischen können einzelne, mehrere oder alle der nachfolgend nochmals stichpunktartig aufgeführten Merkmale oder Vorteile aufweisen:

- Durch die Aufschaltung der zweiten und vierten Stromharmonischen werden die primär kritischen Größen wie Spitzenwert des Zweigstromes oder Effektivwert des Zweigstromes nur wenig vergrößert oder lassen sich sogar reduzieren.
- Eine ungünstige Spannungsrückwirkung über die Zweigdrosseln lässt sich reduzieren.
- Es wird eine übersichtliche Kompensation der Spannungsrückwirkung ermöglicht.
- Das Verfahren ist einfach realisierbar.
- Mit der beschriebenen Methodik der Aufschaltung lässt sich gemäß Simulationsrechnungen eine Verlustreduzierung von 98% - bezogen auf die "optimale", also theoretisch maximal mögliche Verlustreduzierung - erreichen.
- Die Erhöhung des Spitzenwertes (Peak- und "rms"-Wert) des Zweigstromes ist einfach bestimmbar; bei gegebenem, maximal zulässigem Spitzenwert ist die zulässige Stärke der Anwendung des Verfahrens (z. B. durch Wahl der Größe der Amplituden A_{z4} und A_{z2}) leicht bestimmbar.
- Die Spannungsrückwirkung ist einfach bestimmbar.
- Die regelungstechnische Umsetzung ist einfach.
- Das Verfahren ist mit nur einer Führungsgröße ausführbar.
- Der Zweigstrompeak als auslegungstechnisch kritische Größe kann sehr einfach berechnet werden.
- Die Rückwirkung auf die Kondensatormodulspannung ist einfach berechenbar.
- In Multilevelumrichtern (MMC) in Sechspuls-Schaltung mit Halbbrückensubmodulen tritt in allen Arbeitspunkten mit Wirkleistung eine Verlust- und Energiehubreduzierung ein, auch wenn nur geringe, zusätzliche Amplituden aufgeschaltet werden bzw. werden können.
- Es lässt sich die Gefahr reduzieren, dass der Umrichter aufgrund von Spannungsrückwirkung außer Kontrolle gerät bzw. in den ungesteuerten B6-Betrieb gelangt.
- Verglichen mit der Aufschaltung allein einer zweiten Stromharmonischen können durch die zusätzliche Aufschaltung der vierten Stromharmonischen Halbleiterschalter mit kleinerer Stromtragfähigkeit eingesetzt werden, als dies bei einer Aufschaltung allein der zweiten Stromharmonischen möglich wäre.
- Der Umrichter kann mit einem größeren, äußeren Modulationsindex (Verhältnis von AC- zu halber DC-Spannung) betrieben werden, als dies mit der Aufschaltung allein der zweiten Stromharmonischen möglich wäre.
- Die feste Phasenlage der Stromharmonischen und das ggf. fest eingestellte Amplitudenverhältnis erlauben eine einfache Berechnung der Spannungsrückwirkung über die Zweigdrosseln. Die dafür nötige Ableitung der Ströme nach der Zeit ist aufgrund der einfachen Zusammenhänge (Entfall individueller Phasenlagen der Stromharmonischen) relativ einfach und ggf. auch in Echtzeitsystemen realisierbar.

[0091] Obwohl die Erfindung im Detail durch bevorzugte Ausführungsbeispiele näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Variationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzzumfang der Erfindung zu verlassen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Umrichters (10), insbesondere Multilevelumrichters, der zumindest zwei mit Teilmodulen (SM) ausgestattete Modulzweige (TS) aufweist,

- wobei durch Ansteuerung der Teilmodule (SM) in den Modulzweigen jeweils ein Strom - nachfolgend erste Stromharmonische (Iz1) genannt - erzeugt wird, der eine vorgegebene Grundfrequenz aufweist, und
 - wobei durch Ansteuerung der Teilmodule (SM) ein zusätzlicher, innerhalb des Umrichters (10) fließender, Kreisstrom - nachfolgend zweite Stromharmonische (Iz2) genannt - erzeugt wird, der die doppelte Grundfrequenz aufweist,

dadurch gekennzeichnet, dass

durch Ansteuerung der Teilmodule (SM) ein zusätzlicher, innerhalb des Umrichters (10) fließender, Kreisstrom - nachfolgend vierte Stromharmonische (Iz4) genannt - erzeugt wird, der die vierfache Grundfrequenz aufweist.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet, dass

die elektrischen Verluste des Umrichters (10) durch die vierte Stromharmonische (Iz4) reduziert werden und kleiner sind als bei einem Betrieb des Umrichters (10) allein mit der ersten und zweiten Stromharmonischen (Iz1, Iz2).

3. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass

die Phasenlage der zweiten Stromharmonischen (Iz2) relativ zur Phase der ersten Stromharmonischen (Iz1) konstant gehalten wird.

4. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass

durch die Ansteuerung der Teilmodule (SM) bewirkt wird, dass

- die Maxima der ersten Stromharmonischen (Iz1) jeweils mit einem Maximum der zweiten Stromharmonischen (Iz2) zusammenfallen, wenn der Gleichstromanteil (Izdc) in dem jeweiligen Zweigstrom (Iz) positiv ist, und
- die Minima der ersten Stromharmonischen (Iz1) jeweils mit einem Minimum der zweiten Stromharmonischen (Iz2) zusammenfallen, wenn der Gleichstromanteil (Izdc) in dem jeweiligen Zweigstrom (Iz) negativ ist.

5. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass

durch die Ansteuerung der Teilmodule (SM)

- die Maxima der ersten Stromharmonischen (Iz1) jeweils mit einem Minimum der vierten Stromharmonischen (Iz4) zusammenfallen, wenn der Gleichstromanteil (Izdc) in dem jeweiligen Zweigstrom (Iz) positiv ist, und
- die Minima der ersten Stromharmonischen (Iz1) jeweils mit einem Maximum der vierten Stromharmonischen (Iz4) zusammenfallen, wenn der Gleichstromanteil (Izdc) in dem jeweiligen Zweigstrom (Iz) negativ ist.

6. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass

das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der vierten Stromharmonischen (Iz4) und der Amplitude der zweiten Stromharmonischen (Iz2) konstant gehalten wird.

7. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass

das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der vierten Stromharmonischen (Iz4) und der Amplitude der zweiten Stromharmonischen (Iz2) in einem Bereich zwischen 0,4 und 0,7 gehalten wird.

8. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass

der Wert, auf den das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der zweiten Stromharmonischen (Iz2) und der Amplitude der ersten Stromharmonischen (Iz1) geregelt wird, derart gewählt wird, dass die elektrischen Verluste des Umrichters (10) minimal werden.

9. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass

das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der zweiten Stromharmonischen (Iz2) und der Amplitude der ersten Stromharmonischen (Iz1) auf einen Wert geregelt wird, der vom Arbeitspunkt des Umrichters (10) abhängig ist.

10. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der zweiten Stromharmonischen (I_{z2}) und der Amplitude der ersten Stromharmonischen (I_{z1}) auf einen Wert geregelt wird, der vom Leistungsfaktor des Umrichters (10) abhängig ist, insbesondere durch Multiplikation des Leistungsfaktors des Umrichters (10) mit einer Konstanten gebildet wird.
11. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Wert, auf den das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der zweiten Stromharmonischen (I_{z2}) und der Amplitude der ersten Stromharmonischen (I_{z1}) geregelt wird, im Rahmen vorheriger Simulationen des Umrichters (10) für verschiedene Arbeitspunkte als optimal ermittelt worden ist, und zwar insbesondere mit Blick auf minimale elektrische Verluste des Umrichters (10) im jeweiligen Arbeitspunkt.
12. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Wert, auf den das Amplitudenverhältnis zwischen der Amplitude der zweiten Stromharmonischen (I_{z2}) und der Amplitude der ersten Stromharmonischen (I_{z1}) geregelt wird, aus einem Speicher ausgelesen wird, in dem für verschiedene Arbeitspunkte der jeweils einzustellende Wert abgespeichert ist.
13. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
als Umrichter ein Sechspuls-Multilevelumrichter betrieben wird.
14. Umrichter, insbesondere Multilevelumrichter, der zumindest zwei mit Teilmodulen (SM) ausgestattete Modulzweige (TS) sowie eine Steuereinrichtung (20) aufweist, die
 - durch Ansteuerung der Teilmodule (SM) in den Modulzweigen jeweils einen Strom (I_{z1}) - nachfolgend erste Stromharmonische (I_{z1}) genannt - erzeugt, der eine vorgegebene Grundfrequenz aufweist, und
 - durch Ansteuerung der Teilmodule (SM) des Umrichters (10) einen zusätzlichen, innerhalb des Umrichters (10) fließenden, Kreisstrom - nachfolgend zweite Stromharmonische (I_{z2}) genannt - erzeugt, der die doppelte Grundfrequenz aufweist,**dadurch gekennzeichnet, dass**
die Steuereinrichtung (20) derart ausgestaltet ist, dass sie durch Ansteuerung der Teilmodule (SM) einen zusätzlichen, innerhalb des Umrichters (10) fließenden Kreisstrom - nachfolgend vierte Stromharmonische (I_{z4}) genannt - erzeugt, der die vierfache Grundfrequenz aufweist.
15. Umrichter nach Anspruch 14,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Steuereinrichtung (20) die elektrischen Verluste des Umrichters (10) und/oder den Maximalwert des Betrags der Zweigströme (I_z) durch die vierte Stromharmonische (I_{z4}) reduziert, sodass diese kleiner sind als bei einem Betrieb des Umrichters (10) allein mit der ersten und zweiten Stromharmonischen (I_{z1} , I_{z2}).

FIG 1

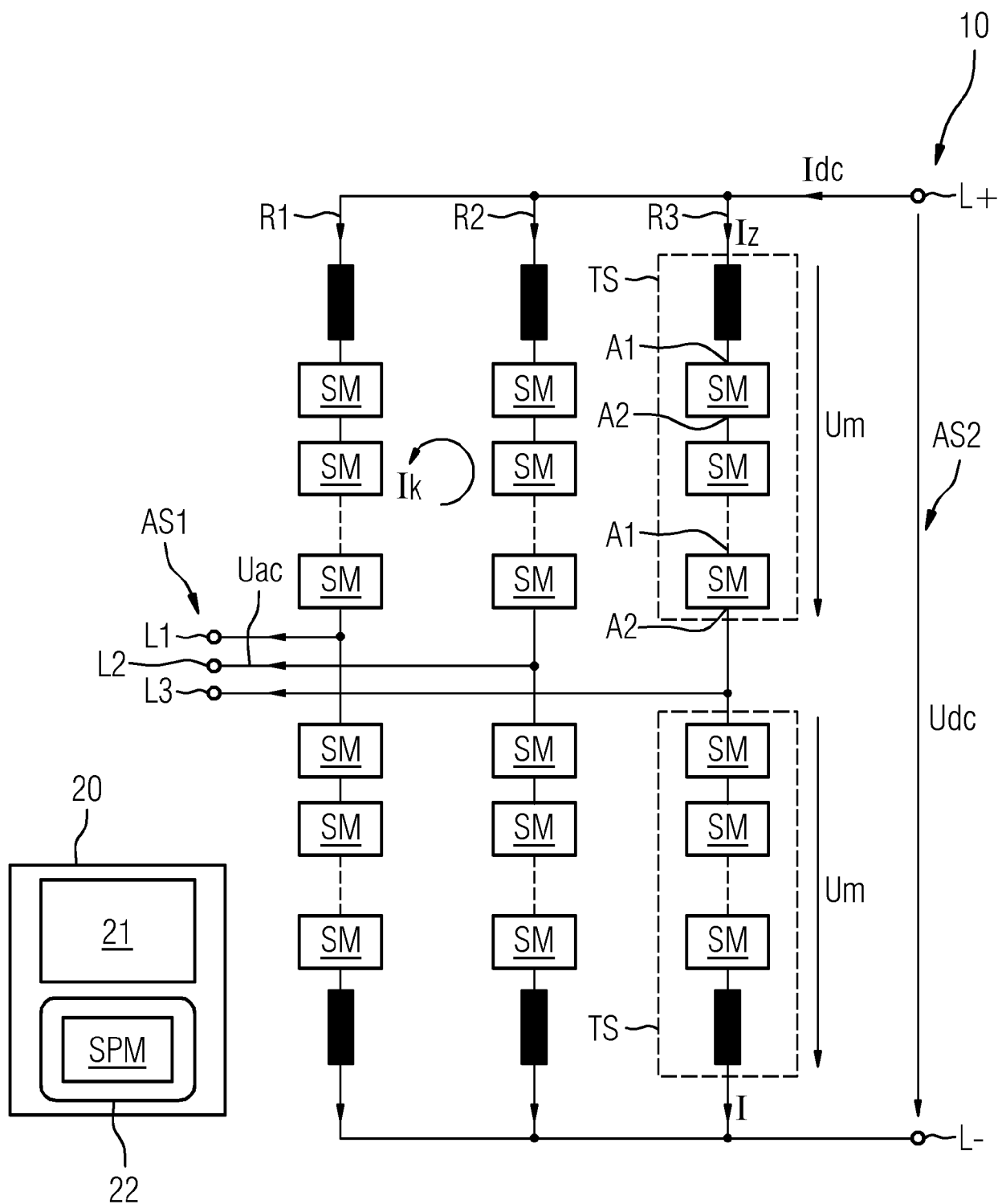


FIG 2

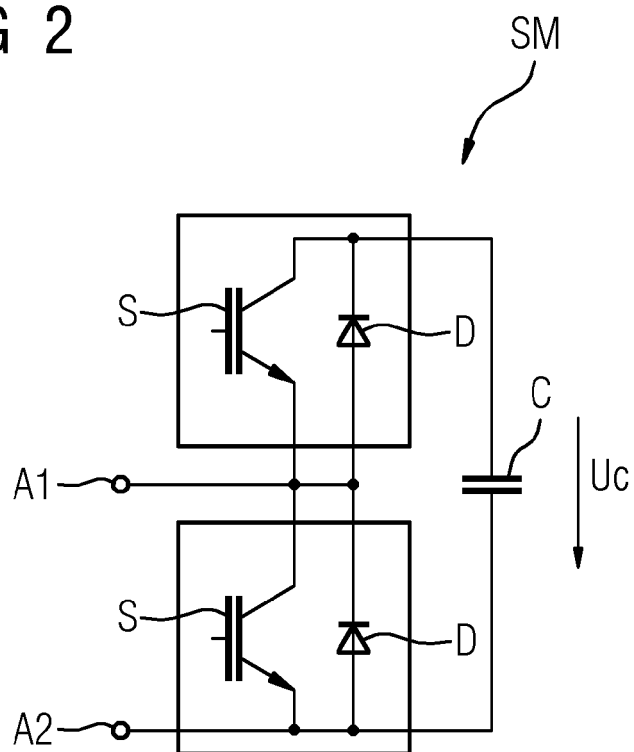


FIG 3

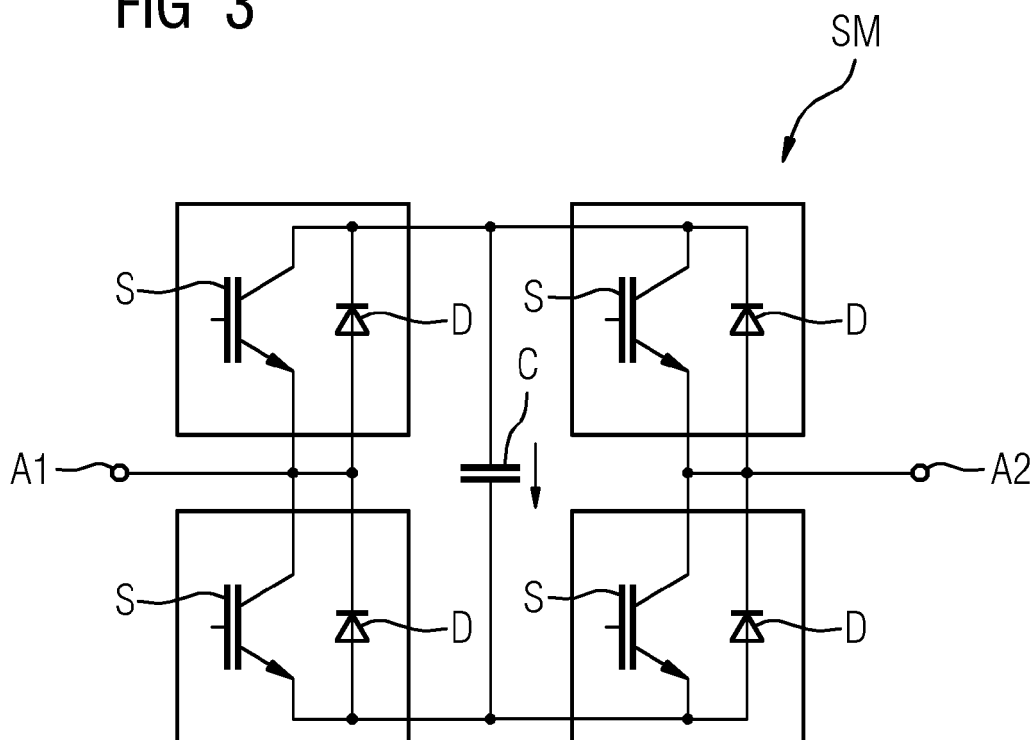


FIG 4

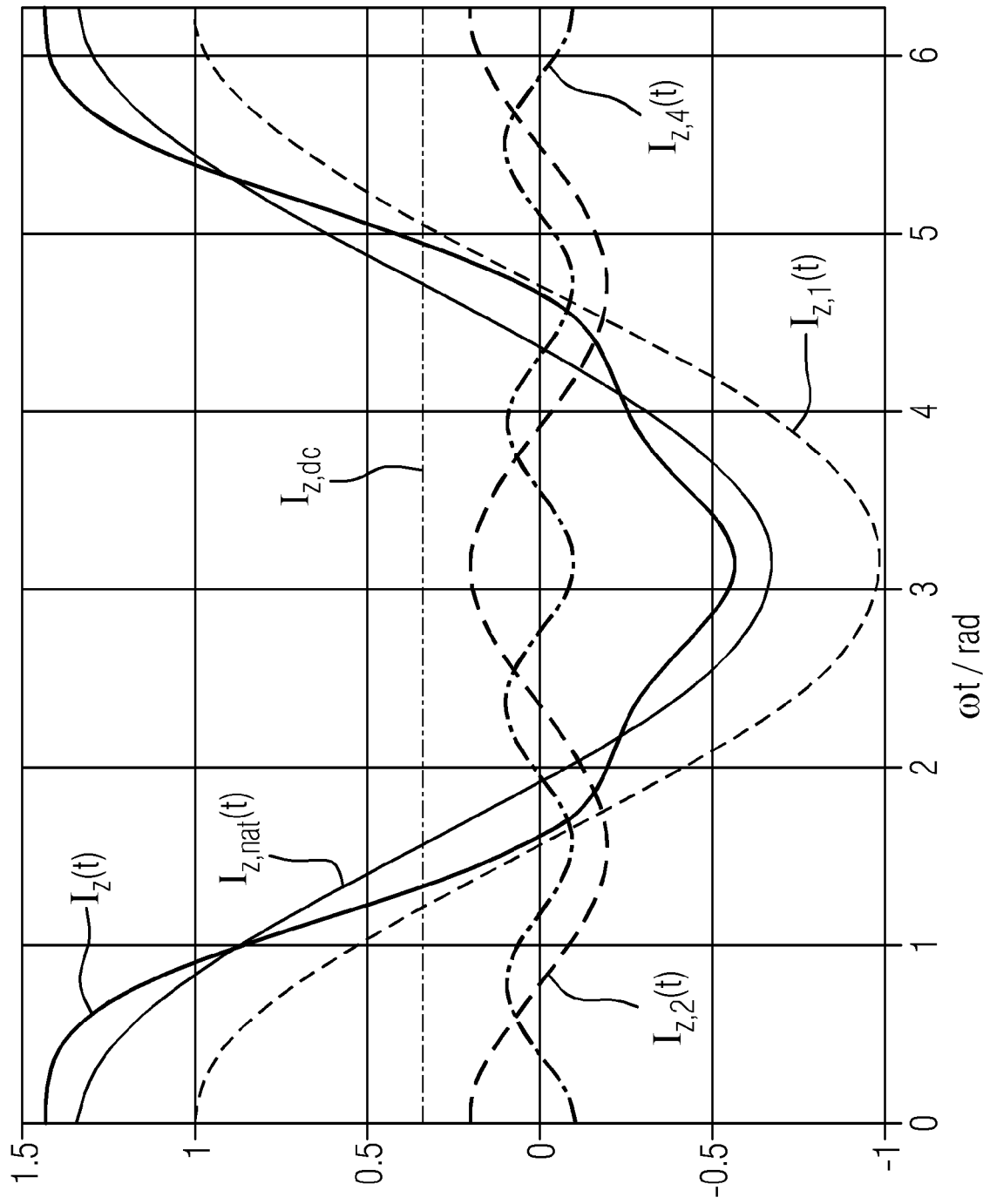


FIG 5

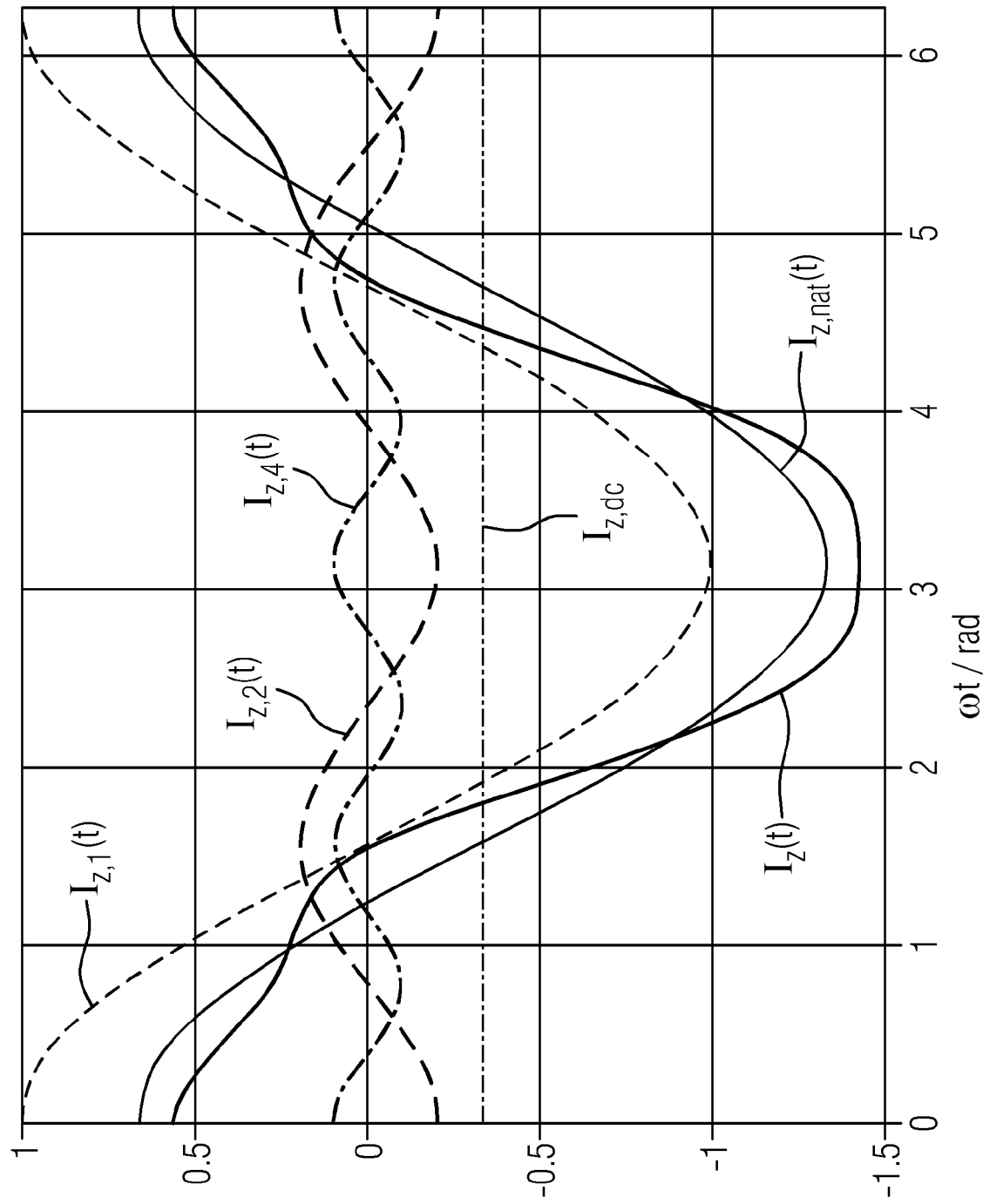


FIG 6

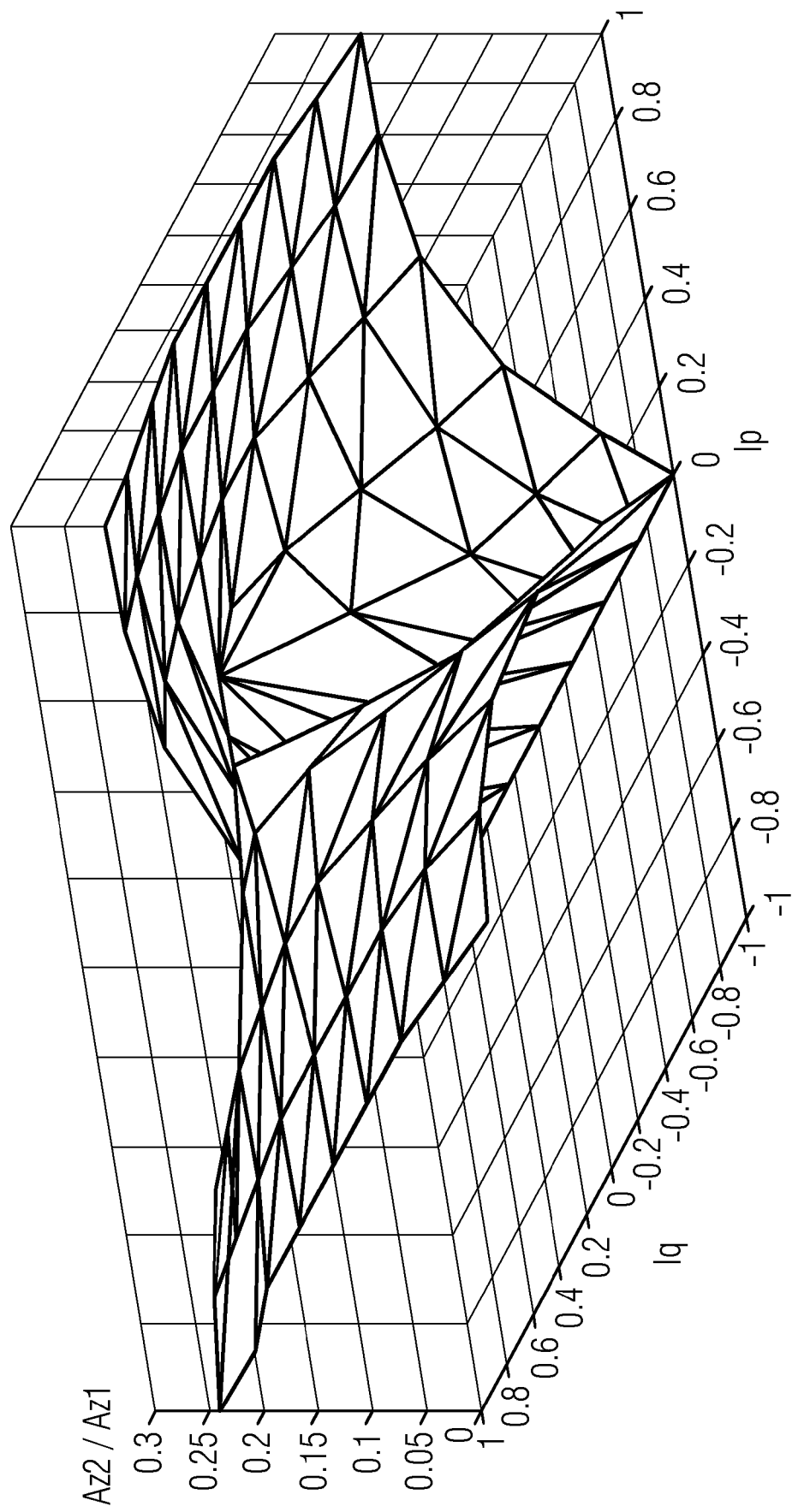
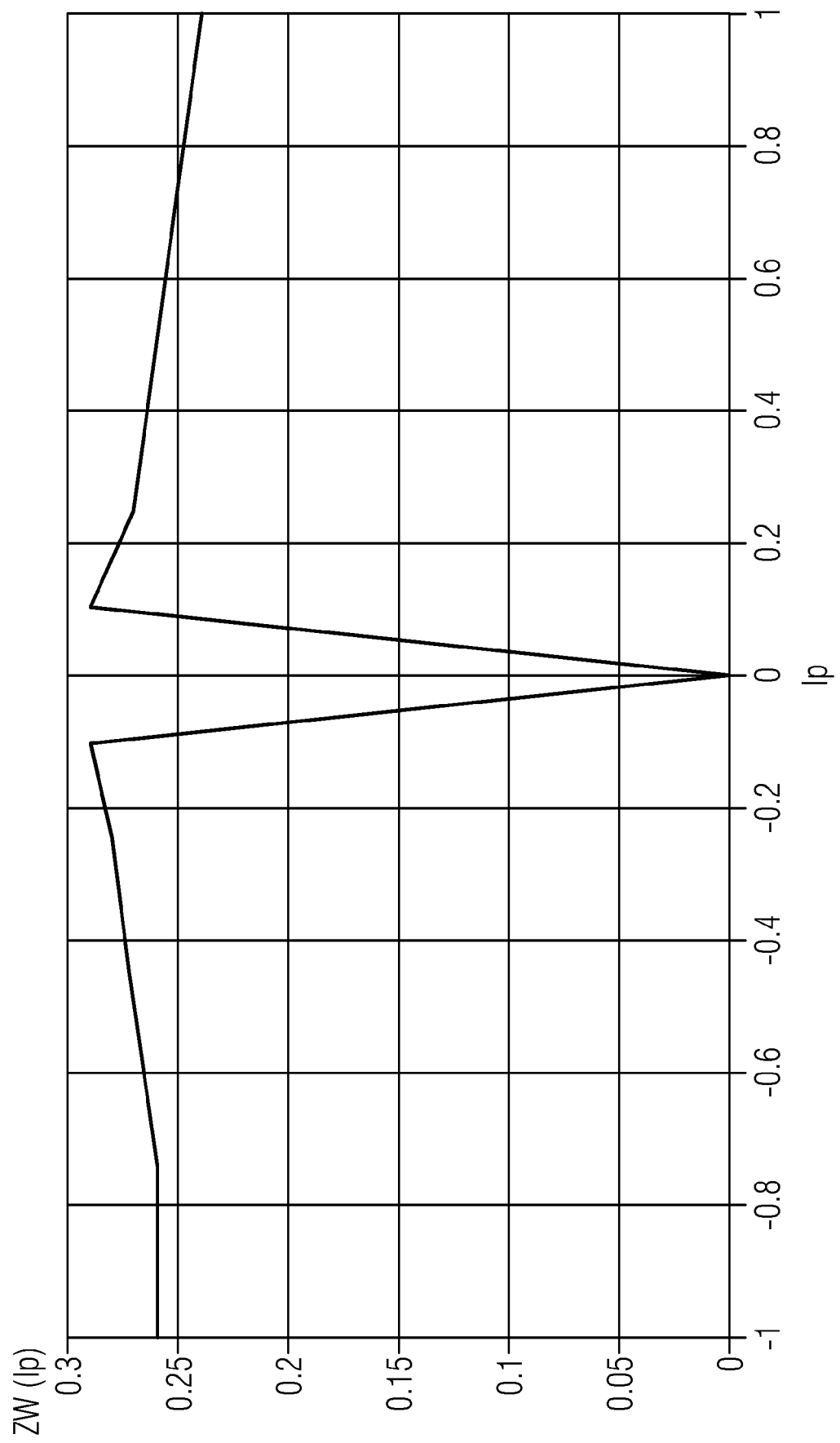


FIG 7





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 20 17 0296

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	WO 2013/071947 A1 (SIEMENS AG [DE]; SCHUSTER DOMINIK [DE]; GAMBACH HERBERT [DE]) 23. Mai 2013 (2013-05-23) * Zusammenfassung * * Formel 3b; Seite 16, Zeilen 24-33; Abbildungen 1-7 *	1-15	INV. H02M1/14 H02M1/15 H02M1/42 H02M1/00 H02M7/483
A	PICAS R ET AL: "Optimal injection of harmonics in circulating currents of modular multilevel converters for capacitor voltage ripple minimization", 2013 IEEE ECCE ASIA DOWNUNDER, IEEE, 3. Juni 2013 (2013-06-03), Seiten 318-324, XP032475513, DOI: 10.1109/ECCE-ASIA.2013.6579115 ISBN: 978-1-4799-0483-9 [gefunden am 2013-08-13] * Zusammenfassung; Abbildungen 1, 9 *	1-15	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			H02M
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort Den Haag		Abschlußdatum der Recherche 24. September 2020	Prüfer Van der Meer, Paul
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 20 17 0296

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

24-09-2020

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
	WO 2013071947	A1	23-05-2013	EP 2756588 A1	23-07-2014
				WO 2013071947 A1	23-05-2013
15	-----				
20					
25					
30					
35					
40					
45					
50					
55					

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- Modular Multilevel Converter: An universal concept for HVDC-Networks and extended DC-Bus-applications. **R. MARQUARDT**. The 2010 International Power Electronics Conference. IEEE, 2010 **[0002]**
- **YANG, LI ; LI, WANG ; XU, GOU**. Loss optimization of MMC by Second-order-Harmonic Circulating Injection. *IEEE Transactions on Power Electronics* **[0003]** **[0049]**